

중형소각로 PCDD/Fs 저감 운전인자

유동준 · 구자공

농업기반공사 환경복원기획팀

I. 서론

폐기물의 소각 배기가스에서는 분진, 산성가스, 미량중금속 그리고 다이옥신류(PCDD/Fs)를 포함한 다양한 종류의 복합오염물질이 고농도로 배출되고 있다. 특히, 1980년대 후반부터 소각로 배기가스는 PCDD/Fs의 주요 배출원으로 국제적 관심사가 되고 있다^(1,2,3).

본 연구에서는 소각 배기가스의 다이옥신 저감을 위한 운전인자와 다이옥신 배출농도의 연관성을 통계적 방법으로 해석하였으며, 해석된 운영인자를 정규화 하였다.

II. 문헌고찰 및 이론연구

염소 함유물질과 전이금속 촉매가 존재하는 상태의 연소에서 발생하는 PCDD/Fs는 대상폐기물의 종류, 소각형식 및 연소실의 기하학적 구조, 고온 배기가스의 냉각방법, 대기오염방지시설의 형식 그리고 소각시설 운전방법에 따라 배출량과 이성질체의 분포특성에 큰 차이가 있다⁽¹⁾.

소각 배기가스의 PCDD/Fs 저감을 위한 운전인자에 대한 연구는 1990년대 초 이후 많이 보고되었다^(1,3). 소각 배기가스 중의 PCDD/Fs는 연소실 또는 후 연소실에서 배기가스의 온도 및 체류시간 그리고 연소실 출구 CO농도의 조절에 의하여 생성량을 감소시킬 수 있고, 또한 열 교환기에서 배기가스의 급속냉각에 의하여 재합성 방지가 가능하다고 알려져 있다⁽⁴⁾.

소각로와 열 교환기를 거치는 동안에 재 생성된 PCDD/Fs는 전기집진기 또는 여과집진기가 부착된 대기오염방지시설에서도 제거가 가능하나, 소각 배기가스의 PCDD/Fs 배출저감 방법으로 가장 좋은 것은 근본적으로 생성 자체를 방지하는 것이다⁽¹⁾. 이를 위해, 여러 종류의 방해물질(inhibitor)과 PCDD/Fs 생성저감을 위한 영향인자가 연구되었으나, 대부분 실험실 또는 pilot 규모 실험이다^(1,3,5,6).

선진국의 경우 운전실적이 많은 대형 도시폐기물 소각시설에서 PCDD/Fs 배출 저감을 위한 운전기술은 정립되었으나⁽⁴⁾, 중,소형 소각시설에 대한 PCDD/Fs 저감 운전기술은 거의 보고된 것이 없다.

국내의 다이옥신관련 연구는 1986년 도시폐기물 소각시설에서의 다이옥신 배출현황 보고 이후 활발하게 진행되고 있으며, 아직은 초기 단계이므로 대부분의 연구가 소각 배기가스와 소각재 또는 비산재에서의 PCDD/Fs 배출농도에 대한 현황조사이다^(2,4,7,8,9). 최근에는 대기방지시설의 형식에 따른 PCDD/Fs 제거효율⁽⁴⁾, 대기방지시설 개선으로 인한 제거효율 향상⁽⁸⁾ 등에 관한 연구가 진행되고 있다.

III. 시험방법

본 연구의 대상 소각시설은 1일 20톤 처리용량의 중형규모 소각시설이다. 주요 장치는 폐기물 정량 투입장치, 고온의 배기가스를 냉각하고 에너지를 회수하기 위한 노통연관식 증기보일러, 그리고 미세

분진과 산성가스(SO_x, HCl), 미량중금속, PCDD/Fs의 흡수와 흡착제거가 가능한 준-건식세정기(Semi-Dry Scrubber)와 반응 생성된 입자상물질을 제거하기 위한 고효율 백필터로 구성되며, 운전인자를 적절히 교체하여 PCDD/Fs 생성저감에 미치는 영향인자들의 효과를 알아 볼 수 있도록 하였다.

다이옥신 생성의 운전인자를 해석하기 위하여, 열 교환기 출구와 연돌에서 PCDD/Fs를 극가지정 분석기관에 의뢰하여 분석하였다. PCDD/Fs은 환경오염 공정시험법에 의하여 현장에서 4시간, 3 Sm³ 이상 배기가스를 등속 흡인하여 입자상은 분진포집 용 여과지, 가스상은 XAD-II 수지에 흡착하여 채취하였으며, 환경오염 공정시험법의 분석과정에 따라 실험실에서 톨루엔으로 16시간 이상 속실험 추출하여 입자상과 가스상 시료를 병합하여 농축과정을 진행하였다. 전처리 완료 후, 최종용액 40~100 μl를 준비하여 분석하였다. 분석조건은 GC의 경우, Column은 SP2331 60m x 0.32mm ID x 0.2μm Film Thickness을 사용하였으며, MS는 분해능 10,000 이상 (10% Valley 기준), 선택이온검출방법(SIM), 전자충격이온화방식(EI, 32eV), 이온화실온도 270℃에서 분석하였다.

IV. 결과 및 고찰

먼저 폐기물 소각로에서 PCDD/Fs 배출저감을 위해 전통적으로 사용하고 있는 운전 영향인자들과 PCDD/Fs의 배출농도와의 관련성을 해석하였다. 그리고 계속하여 현장 소각로 운전자들이 PCDD/Fs 배출저감을 위해 적용하고 있는 운전 Know-How인 새로운 영향인자를 해석하였다.

1. 전통적인 PCDD/Fs 배출저감의 영향인자

(1) 소각로 출구 배기가스 온도

실제 현장에서는 소각로 출구온도를 850~1,100℃ 범위에서 완벽하게 유지하는 경우에도 연돌에서의 배기가스 다이옥신 배출농도를 원하는 수준까지 조절하기에는 많은 어려움이 있음을 경험한다.

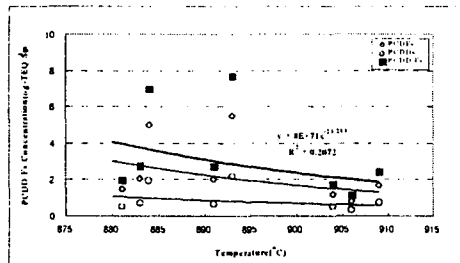


Fig. 1. Out. Temp. of Flue Gas at 2nd Combustion Chamber vs. PCDD/Fs Concentration at Stack.

Fig. 1은 중형소각로 2차연소실 출구의 배기가스 온도와 다이옥신 배출농도와의 관계를 나타내고 있는 바, 배기가스 온도가 높을수록 다이옥신 배출농도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 상관계수(r^2)는 0.2로 매우 낮아서 연소실 출구 배기가스 온도 이외에도 다른 영향인자가 많이 있음을 의미하고 있다.

(2) 소각로 2차연소실 배기가스 체류시간

소각로 2차연소실은 폐기물로부터 분해 생성된 분해가스와 연소용 공기의 혼합에 의한 가스연소가 주로 일어나는 구역이며, 배기가스의 체류시간이 증가하면 다이옥신 생성의 원인물질이 되는 불완전 연소생성물과 비산재 발생이 저감되어 다이옥신 발생량을 줄일 수 있다^(1,7).

Fig. 2 중형소각로의 경우에서 볼 때, 배기가스의 체류시간이 증가하면 다이옥신 배출농도는 어느 정도 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나, 배기가스 체류시간이 다이옥신 저감 가능 조건으로 알

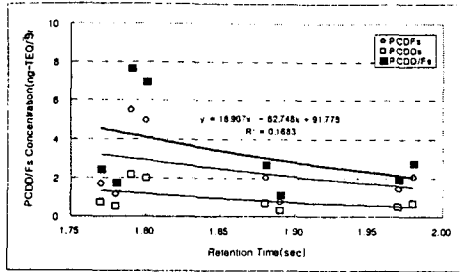


Fig. 2. Retention Time of Flue Gas at 2nd Comb. Chamber vs. PCDD/Fs Concentration at Stack.

려진 1.8-2초의 범위에 있음에도 상관계수(r^2)는 0.17로 매우 낮아서 두 분석인자 사이에는 관련성이 매우 낮은 것으로 해석된다.

(3) 소각로 2차연소실 출구 CO농도

소각로 운전자들은 배기가스의 일산화탄소 농도가 다이옥신 농도와 비례하는 것으로 인식하고 있다. 이러한 이유로 CO 농도를 다이옥신 규제 지표물질로 간주하고 있는 것 또한 사실이다⁽⁴⁾.

그러나, 많은 경우에 CO 농도는 매우 낮지만 다이옥신배출농도는 상상할 수 없이 높은 경우 또는 반대로 CO 농도는 우려할 정도로 높지만 다이옥신배출농도는 매우 낮은 상황을 보면서 작업자들은 당황하곤 한다.

시험결과 CO 농도와 다이옥신 농도와는 상관성이 매우 낮으며, 오히려 CO농도가 낮을 때 PCDD/Fs농도가 더 높은 현상을 보이기도 한다. 즉, 소각 배기가스의 CO농도는 폐기물 중의 탄소성분에 대한 연소효율을 나타내는 지표는 될 수 있을 지 몰라도, 다이옥신의 배출농도의 지표로 보기에 는 무리가 있으며 현장규모에서의 좀 더 구체적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

2. 중형소각로 PCDD/Fs 배출저감의 영향인자

(1) 투입량조절에 의한 PCDD/Fs 배출저감

폐기물 소각로에서 다이옥신 배출저감을 위해 현장 운전자들이 선택할 수 있는 방법 중 한가지는

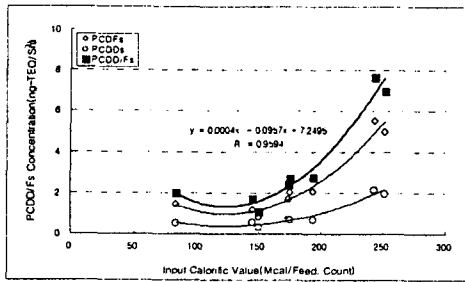


Fig. 3. Input Caloric value of Furnace vs. PCDD/Fs Concentration at Stack.

폐기물의 투입량과 성분을 균질화하는 방법이다. Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이, 폐기물의 순간 투입열량은 다이옥신 배출농도 조절에 중요한 인자가 될 수 있다($r^2=0.9594$). 실제 현장에서 정량투입을 위해서는 작업자의 철저한 교육과 함께 과잉 투입을 차단할 수 있도록 기계적인 안전장치를 하는 것도 필요하다.

(2) 연소안정화에 의한 PCDD/Fs 배출저감

본 연구에서는 CO농도가 순간적으로 변할 때, 즉 연소상태의 갑작스런 변화가 다이옥신 배출

량에 영향을 준다는 것을 경험적으로 알고 있는 현장 작업자들의 경험을 정량화 하였다. 물론, CO농도 변화가 계속되는 동안에도 연소효율은 99.9% 이상을 유지하고 있다.

Fig. 4와 같이, 연소배기가스의 CO농도 순간변화는 다이옥신 배출농도에 큰 영향을 주고 있으며, 순간 변화 횟수가 많을수록 다이옥신 배출 농도는 급증하는 것을 알 수 있다.

(3) 대기방지시설에서의 다이옥신 제거

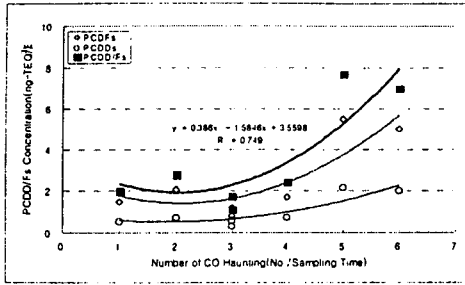


Fig. 4. Number of CO Haunting During Sampling vs. PCDD/Fs Concentration at Stack.

시험결과, 다이옥신 배출농도는 분말활성탄 주입농도와 밀접한 관련성이 있으며, 주입농도가 증가할수록 다이옥신 농도는 급격히 감소하였다. 그러나 200mg/Sm³ 이상에서는 저감효율 증가가 거의 없다.

또한, 여과집진기 출구에서의 배기가스 분진농도와 다이옥신 농도와의 관련성을 시험한 결과, 분진 농도 증가는 곧 바로 다이옥신 배출량 증가로 나타남을 알 수 있었다. 상관성도 매우 높아서, 다이옥신 배출저감을 위해서는 분진농도 제어가 매우 중요함을 시사하고 있다.

3. 운전인자의 정규화(Normalization)

다이옥신 배출 저감을 위한 운전인자를 전처리 투입, 연소조건, 생성 후 제거 등 3가지 경우로 분류하여 대표적인 운전인자를 정규화(normalization) 하므로써, 이들 운전인자들을 타 소각시설에서도 효과적으로 이용할 수 있도록 하였다.

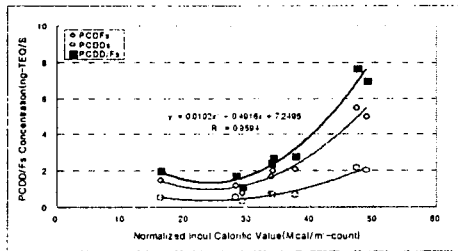


Fig. 5. Normalized Input Caloric value for PCDD/Fs Minimization.

상태에서 불완전 연소에 의한 다이옥신배출 저감 대책이 반드시 필요하다. 또한, 보일러 내부와 배기가스의 이송 덕트 중에 침적되어 있는 비산재의 de-Nove 합성에 의한 다이옥신 생성, 소위 "메모리효과(memory effect)"를 극소화 할 수 있는 내부 구조 및 운전기술이 필요하다⁽⁶⁾.

V. 결론

소각시설 배기가스에서 다이옥신 배출량을 줄이는 가장 직접적이면서도 최후의 방법은 생성된 다이옥신을 직접 제거하는 방법이다.

지금까지 알려진 다이옥신의 제거 방법 중에서 기술적, 경제적으로 가장 효율적인 방법은 분말활성탄 주입장치가 부착된 준건식세정기(Semi-Dry Scrubber)와 표면여과방법의 여과집진기를 조합한 시설이다⁽⁴⁾. 본 연구에서 사용된 활성탄은 역행탄 계열이며 입자크기는 #325 이었고, 배기가스 온도 160℃영역에 80~250mg/Sm³ 농도로 주입하였다.

시험결과, 다이옥신 배출농도는 분말활성탄 주

Fig. 5는 순간 투입열량을 연소실 화상 단위면적당 부하율로 정규화 하였다. 설계용량의 20%를 초과하여 연소실에 열 부하를 가할 경우, 다이옥신 배출량이 급격히 증가하는 경향을 보이고 있으며, 알려진 바와 같이 소각로는 부하운전 범위 70~110%에서 운전하는 것 PCDD/Fs 배출저감에 효과적임을 나타낸다.

국내에서 운전되고 있는 대부분의 중형규모 소각로는 연속으로 운전되지 않고, 일 8~16시간 범위에서 단속운전을 하는 경향이 있다. 따라서, 폐기물 소각운전 초기와 운전 종료 시의 비정상

중·소형소각시설이 전체 소각로의 99% 이상을 차지하는 국내의 실정에서, 이들에 대한 다이옥신 저감운전기술을 확립하는 것은 매우 시급하다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 현장 소각로 작업자들의 PCDD/Fs 배출량 저감운전 Know-How를 정량화 하였으며, 다이옥신 저감을 위한 새로운 운전인자로서 폐기물 순간 투입 열량, CO농도 순간 변화 횟수, 분말활성탄 주입율, 배기가스 분진농도 제어 등을 제안하였다.

(2) 소각로 폐기물 투입방법 조절이 다이옥신 배출저감에 중요한 운전인자($r^2 = 0.9594$)가 되며, 다이옥신 배출농도는 연소효율보다는 안정적 연소상태에 의해 더 큰 영향을 받는다. 즉, 배기가스의 CO 배출농도 보다는 CO농도의 순간변화 횟수가 다이옥신 배출농도와 밀접한 관계($r^2 = 0.8052$)가 있다.

(3) 소각시설 배기가스의 다이옥신 배출량을 줄이는 가장 직접적인 방법은 생성된 다이옥신을 제거하는 방법이며, 이는 분말활성탄 주입에 의한 흡착제거($r^2 = 0.7145$)와 배기가스의 미세분진 제거($r^2 = 0.8551$)에 의해 가능하다.

VI. 참고문헌

1. Kari Tuppurainen, Ismo Halonen, Paivi Ruokojarvi, Juhani Tarhanen and Juhani Ruuskanen (1988), "Formation of PCDDs and PCDFs in Municipal Waste Incineration and its Inhibition Mechanisms: a Review", Chemosphere, Vol. 36, No. 7, pp. 1493-1511.
2. Jeong-Eun Oh, Kyung-Tae Lee, Jae-Whan Lee and Yoon-Seok Chang(1999), "The Evaluation of PCDD/Fs from Various Korean Incinerators", Chemosphere, Vol. 38, No. 9, pp. 2097-2108.
3. Fangmark, I., van Bavel, B., Marklund, S., Rappe, C., Stromberg, B. and Berge, N.(1993), "Influence of Combustion Parameters on the Formation of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins, Dibenzofurans, Benzenes, and Biphenyls and Polyaromatic Hydrocarbons in a Pilot Incinerator", Env. Sci. & Tech., Vol. 27, No. 8, pp. 1602-1610.
4. 김삼권, 전성환, 홍정선, 김기현, 김재형, 권명희, 김승진, 정동희, 문만상, 정을규, 장태혁 외(1998), "도시쓰레기 소각시설의 방지시설 별 다이옥신 처리효율 조사 연구", 국립환경연구원.
5. Gullett, B.K. and Lemleux, P.M.(1994), "Role of Combustion and Sorbent Parameters in Prevention of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxin and Polychlorinated Dibenzofuran Formation During Waste Combustion", Env. Sci. & Tech., Vol. 28, No. 1, pp. 107-118.
6. Blumenstock, M., Zimmermann, R., Schramm, K. W. and Kettrup, A.(2000), "Influence of Combustion Conditions on the PCDD/F-, PCB-, PCBz- and PAH-Concentration in the Post-Combustion Chamber of a Waste Incineration Pilot Plant", Chemosphere, Vol. 40, pp. 987-993.
7. 신찬기, 김삼권, 정일록, 전성환, 김기현, 권명희, 김재형, 정상구(1999), "소각시설 구조 및 성능 평가 기준(안) 제정에 관한 연구(II)", 국립환경연구원보, 제21권, pp. 281 -295.
8. 이재효, 이동훈, 이정주(2000), "시설 및 운전조건 개선에 의한 도시 고형 폐기물 소각시설에서의 PCDDs /DFs의 저감", 한국폐기물학회지, Vol.17, No.6, pp. 789-795.
9. 정태웅, 김연호, 정다위, 신선경, 김진경, 박찬혁, 김동일, 김성립, 윤민현, 최승석, 허종수(1999), "도시쓰레기 소각재 중의 유해물질 함량 조사연구", 국립환경연구원보, 제21권, pp.311-323.